

基于压缩感知的稀疏阵列 MIMO 雷达成像方法

顾福飞* 池龙 张群 彭发祥 朱丰

(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

摘要: 针对 MIMO 雷达对空目标单次快拍成像时天线数目较多问题, 该文提出了一种稀疏阵列 MIMO 雷达成像方法。首先分析了 MIMO 雷达天线的稀疏布阵方式, 其次结合压缩感知理论具体阐述了稀疏阵列 MIMO 雷达成像方法。该方法不仅能够对运动目标实现单次快拍成像, 避免了目标机动带来的运动补偿难题, 同时又能够大幅减少 MIMO 雷达的天线规模, 便于工程实现。最后利用仿真实验验证了所提方法的有效性。

关键词: MIMO 雷达; 稀疏阵列; 压缩感知; 单次快拍成像

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)10-2452-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00287

An Imaging Method for MIMO Radar with Sparse Array Based on Compressed Sensing

Gu Fu-fei Chi Long Zhang Qun Peng Fa-xiang Zhu Feng

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The number of antenna elements of MIMO radar is too many when imaging for moving target with single snapshot. To solve the problem, an imaging method for MIMO radar with sparse array is proposed. Firstly the configuration of sparse antenna array is analyzed. Then, combining Compressed Sensing (CS) theory, a novel imaging algorithm for MIMO radar with sparse array is put forward. Single snapshot imaging for moving target is implemented by this algorithm, which not only can avoid the difficulty of motion compensation aroused by the target's maneuver, but also can reduce the number of antenna, it is the advantage to engineering practice. Finally, the effectiveness of this algorithm is validated by the simulative results.

Key words: MIMO radar; Sparse array; Compressed Sensing (CS); Single snapshot imaging

1 引言

随着现代技术的不断发展, 利用高分辨 2 维图像获取和分辨空中目标特征、属性等信息已经成为现代雷达技术的一个重要发展方向^[1]。本质上, 运动目标的 2 维成像就是要完成雷达相对于目标的大转角空间采样, 当前主要技术有逆合成孔径雷达 (ISAR)^[2]和实孔径雷达 (RAR)^[1]。ISAR 对空目标运动成像的实时性比较差, 若对非合作运动目标成像需要克服运动补偿难题。RAR 能够通过空间的并行采样取代 ISAR 时间上的多脉冲采样, 避免了时间上的多脉冲采样对不同时刻观测回波的运动补偿问题^[1]。但 RAR 具有阵列规模过大、造价昂贵的缺点。因此寻求一种既能够对空中运动目标实现实时成像又能够有效降低阵列规模的技术成为对空成像雷达发展的迫切需求。MIMO 雷达是近年来提出的一种

新体制雷达^[3,4], 该雷达可以利用其多发多收体制形成的虚拟天线阵元替代实际天线阵元, 因此它只需要少数的物理阵元并采用专门的布阵方式即可达到与 RAR 阵列基本一致的成像效果, 这样就有效减少了系统成本。文献[5]给出了 MIMO 雷达实现空中运动目标单次快拍成像的方法, 但其需要的天线数仍然较多。文献[6]将 MIMO 雷达与 ISAR 技术结合起来进行成像, 该方法有效减少了天线阵元但没有实现单次快拍成像, 需要一定的运动补偿。如果能够大幅降低 MIMO 雷达阵列规模条件下获得高质量的实时成像结果, 对于空中运动目标成像具有重要的意义。

压缩感知 (Compressed Sensing, CS) 理论是数学家 Donoho 于 2006 年提出的一种数据压缩与重建理论^[7]。近年来, CS 理论成为信号处理领域中的一个研究热点^[8-10]。该理论指出, 若信号是稀疏的或在某个变换域稀疏, 则可用一个与变换基不相关的观测矩阵将高维信号投影到低维空间, 通过求解优化问题即可从低维观测中以高概率重构原信号。文

2011-03-27 收到, 2011-07-13 改回

国家 973 计划项目 (2010CB731905) 和国家自然科学基金 (60971100) 资助课题

*通信作者: 顾福飞 gffpan@126.com

献[11]将 CS 理论引入到 MIMO 雷达阐述了一种降低目标响应间相关性的波形设计方法,文献[12]利用目标在角度-多普勒-距离域的稀疏性,运用 CS 理论基于少量测量值即可得到目标角度-多普勒-距离信息的联合估计,从而实现 MIMO 雷达的超分辨。但从现有的文献来看,还未见到将 CS 理论与 MIMO 雷达相结合来实施对空中运动目标实时成像。本文借鉴 CS 理论降维的思想,提出一种稀疏阵列 MIMO 雷达成像方法,该方法能够大幅减少线性阵列 MIMO 雷达单次快拍成像所需的阵元数,同时保证了目标实时成像的高质量。

本文的结构组织如下:第 2 节首先给出 MIMO 雷达的发射信号形式,其次分析了 MIMO 雷达天线的稀疏布阵方式;第 3 节在详细阐述压缩感知基本理论的基础上,介绍了稀疏阵列 MIMO 雷达的成像方法;第 4 节是按照本文的方法步骤展开相关的仿真实验;第 5 节对全文进行了总结。

2 发射信号形式及稀疏天线布阵方式

2.1 发射信号形式

MIMO 雷达由于收发阵列均采用多阵元天线结构,因此为保证各信号通道的相互独立性,发射的信号彼此之间需要是正交的。混沌相位编码信号具有良好的相关特性^[13],因此可将其作为 MIMO 雷达的发射信号。设 MIMO 雷达是 M 发 N 收的,那么需要发射 M 路正交信号,第 m 路信号的表达式可写为

$$s_m(t) = \exp(j2\pi f_0 t) p_m(t), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

其中 f_0 为载频, $p_m(t)$ 为混沌相位编码信号, $p_m(t)$ 的表达式为^[13]

$$p_m(t) = \exp\left\{j\pi \sum_{\tilde{m}=1}^{\tilde{M}} C_{m\tilde{m}} \text{rect}(t - \tilde{m}\tau)\right\}, \quad 0 < t < \tilde{M}\tau \quad (2)$$

其中 $C_{m\tilde{m}}$ 是利用 logistic 映射产生第 m 路第 \tilde{m} 个子码元包络值,取值为 1 或者 0。 τ 为子码元时宽, \tilde{M} 为子码元数。容易证明发射信号之间满足

$$\int_0^{\tilde{M}\tau} s_{m_1}(t) s_{m_2}^*(t) dt = \gamma(m_1 - m_2) m_1, \quad m_2 = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

其中 $\gamma(t)$ 是混沌编码信号的相关函数,如前所述,混沌相位编码信号具有良好的自相关特性和互相关特性,因此可近似认为各路信号相互正交。

假设目标为点目标,目标与第 m 个发射阵元的距离为 R_m ,与第 $n(n = 1, 2, \dots, N)$ 个接收阵元的距离为 R_n ,则第 n 个接收阵元的雷达回波可表示为

$$S_n(t) = \sum_{m=1}^M \sigma s_m(t - \tau_{mn}) \quad (4)$$

其中 σ 为点目标的散射系数, $\tau_{mn} = (R_m + R_n)/c$ 为第 m 个发射阵元与第 n 个接收阵元组合的延时。各个接收阵元的信号分流处理过程相同,其具体过程如图 1 所示。

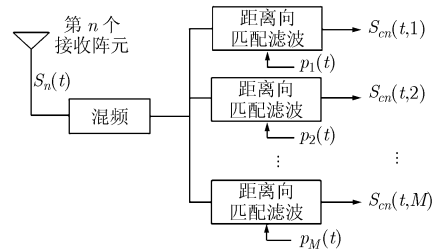


图 1 第 n 个接收阵元回波信号分流处理框图

所有的接收阵元都进行图 1 的信号分流处理后,可以得到目标的 $M \times N$ 个不同方向的空间采样数据,这样 MIMO 雷达就可以通过 M 发 N 收天线阵列只发射单次脉冲就得到 $M \times N$ 个空间采样。如果采用合理的天线布阵方式则可以实现对空中运动目标的单次快拍成像^[5]。

2.2 稀疏天线布阵方式

根据等效相位中心近似(PCA)原理^[14], M 发 N 收的 MIMO 雷达系统可以等效为 $M \times N$ 个收发同置阵元的天线阵列。为了最大限度的发挥 MIMO 雷达空间采样的优势和便于后续处理,本文采用一种线性布阵的 MIMO 雷达^[6]:发射阵列和接收阵列均线性均匀排布,接收阵元间隔为 d ,那么发射阵元间隔为 Nd 。根据 PCA 原理,这样就可以等效形成了间距为 $d/2$ 的 $M \times N$ 个收发同置阵元组成的均匀阵列,如果给出的天线阵列足够长且阵元数足够多,能够达到观测孔径和采样率的要求,那么运用合适的成像方法就可以实现对空中运动目标的实时成像^[5]。

但在实际应用中这样的阵列比较大,因此本文构造稀疏的阵列用以大幅减少 MIMO 雷达天线阵元。通常情况下, MIMO 雷达为了保证发射信号的正交性,发射阵元数目远小于接收阵元数目。因此本文主要对较多的接收阵元进行稀疏化:在原始 N 个接收阵元位置随机布置 N' ($N' < N$) 个接收阵元,但第一个和最后一个接收阵元位置不变,接收阵列的稀疏程度可定义为 $\eta = N'/N$ 。那么根据 PCA 原理,收发同置阵列减少了 $M \times (N - N')$ 个阵元,但阵列总长度即观测孔径保持不变。下面以 3 发 6 收的天线阵列为例来说明该稀疏化的方法。原始天线阵列如图 2(a)所示,图 2(c)是由原始阵列等效得到

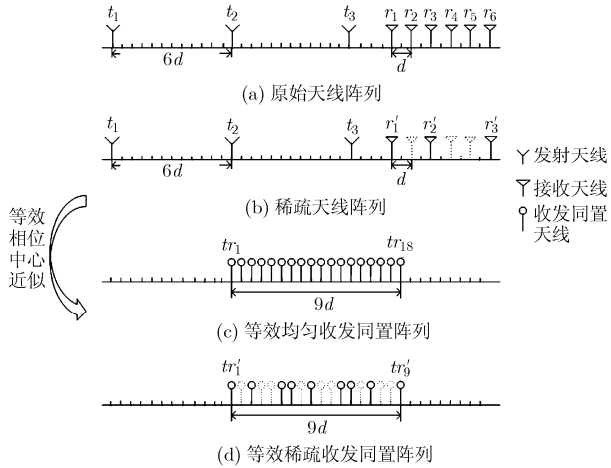


图 2 天线结构及其稀疏化示意图

的收发同置均匀阵列。

在原始接收阵列的 6 个阵元位置随机布置 3 个接收阵元, 假设在 r_1, r_3, r_6 的位置布置, 发射阵列保持不变如图 2(b)所示。因此根据 PCA 原理, 稀疏后阵列等效得到的收发同置阵列相应的缺少了 9 个阵元如图 2(d)所示。但相对于图 2(c)该稀疏阵列的总长度不变仍然为 $9d$, 从而不影响方向分辨率。

3 基于 CS 理论的 MIMO 雷达成像方法

3.1 压缩感知的基本理论

对于一个有限长的 1 维信号 $H \in R^{N_1}$, 假设其在某规范正交基 $\Psi = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{N_1}\}$ 下可以表示为

$$H = \sum_{i=0}^{N_1-1} \theta_i \psi_i \quad (5)$$

其中 θ_i 为投影系数。式(5)可以写为矩阵形式 $H = \Psi\Theta$, 其中 $\Theta = \{\theta_i\}$ 为 $N_1 \times 1$ 维的列向量, 如果 Θ 中只有 K 个不为零的元素, 且 $K \ll N_1$, 则说明该信号 H 是 K -稀疏的, Ψ 称为稀疏变换矩阵。CS 理论指出, 当对于一个 K -稀疏的信号 H 可用一个大小为 $M_1 \times N_1$ 维的观测矩阵 Φ ($M_1 \ll N_1$, $M_1 \geq O(K \cdot \lg(N_1/K))$)^[7]对 H 进行降维观测, 得到观测集合 U , 即

$$U^{M_1 \times 1} = \Phi^{M_1 \times N_1} H^{N_1 \times 1} = \Phi^{M_1 \times N_1} \Psi^{N_1 \times N_1} \Theta^{N_1 \times 1} \quad (6)$$

显然观测集合 U 的元素个数远小于 H 的元素个数, 从而实现了信号的稀疏采样。从观测集合 U 重构信号 H 实际上是一个求解欠定方程组的问题, 由于测量值 M_1 远小于信号维度 N_1 , 因此式(6)的逆问题是一个病态问题, 无法直接求解。但由于已知 Θ 具有稀疏特性, 因此可将式(6)转化成求解 l_1 范数问题:

$$\Theta = \arg \min \|\Theta\|_1 \quad \text{满足} \quad U = \Phi\Psi\Theta \quad (7)$$

为了保证高概率的重构 Θ , $\Phi\Psi$ 必须满足有限等距性质(Restricted Isometry Property, RIP)^[15]。

对于求解式(7), 可利用已有的凸优化数学理论基础, 采用运算效率较高的正交匹配追踪(OMP)算法^[16]或者基追踪(BP)算法^[17]。

3.2 成像方法

MIMO 雷达采用上述稀疏天线布阵方式, 设其是 M 发 N' 收的, 与点目标的几何关系如图 3 所示, 天线阵列沿 x 轴排布, 发射阵元的坐标定义为 $T = [x_1, x_2, \dots, x_M]$, 接收阵元的坐标定义为 $R = [x'_1, x'_2, \dots, x'_{N'}]$, 点目标 C 的坐标为 (x_0, y_0) , 那么 C 到第 m 个发射阵元的距离 $R_m = \sqrt{(x_m - x_0)^2 + y_0^2}$, 到第 n' 个接收阵元的距离 $R_{n'} = \sqrt{(x'_{n'} - x_0)^2 + y_0^2}$, $n' = 1, \dots, N'$ 。

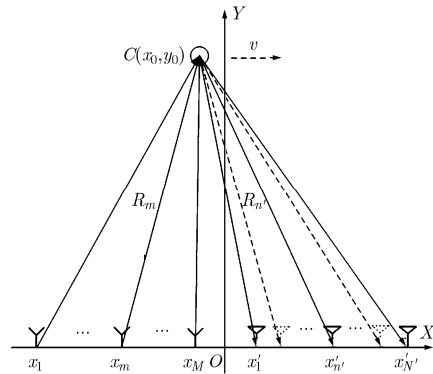


图 3 MIMO 雷达天线阵列与目标的成像几何关系图

在远场条件下, 可假设目标到阵列的纵向距离远大于目标与各个阵元之间的横向距离差。因此根据 Taylor 展开公式, 目标到收发阵列的距离和 $R_{mn'}$ 可近似表示为

$$\begin{aligned} R_{mn'} &\approx y_0 + \frac{(x_m - x_0)^2}{2y_0} + y_0 + \frac{(x'_{n'} - x_0)^2}{2y_0} \\ &= 2 \left[y_0 + \frac{1}{2y_0} \left(x_0 - \frac{x_m + x'_{n'}}{2} \right)^2 \right] + \frac{(x_m - x'_{n'})^2}{4y_0} \quad (8) \end{aligned}$$

等效的收发同置阵列的坐标定义为 $TR = [\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_{MN'}]$, 点目标 C 到第 i ($i = 1, 2, \dots, M \cdot N'$) 个收发同置阵元的距离 $R_i = \sqrt{(\tilde{x}_i - x_0)^2 + y_0^2}$ 。同样地, R_i 也可近似表示为 $R_i \approx y_0 + (\tilde{x}_i - x_0)^2 / 2y_0$ 。根据 PCA 原理, 我们知道, 第 m 个发射阵元 n' 个接收阵元组合对应收发同置阵列第 i 个阵元, 其中 $i = (m - 1) \times N' + n'$, 那么就有 $\tilde{x}_i = (x_m + x'_{n'}) / 2$ 。因此, 可以发现如果用收发同置阵列代替 MIMO 雷达的原始阵列将会产生距离差 $\Delta R = (x_m - x'_{n'})^2 / 4y_0$, 这在后续的成像处理中应该补偿掉。

第 n' 个接收阵元收到的回波信号 $S_{n'}(t)$ 经过分流处理, 可得

$$S_{cn'}(t, m) = \sigma \gamma \left(t - \frac{R_{mn'}}{c} \right) \exp \left(-j \frac{2\pi R_{mn'}}{\lambda} \right) \quad (9)$$

其中 $\gamma(t)$ 是混沌相位编码信号的相关函数， λ 是发射信号的波长。对式(9)做关于时间 t 的傅里叶变换 (FT)，得到

$$S_{cn'}(f, m) = \sigma R(f) \exp \left(-j2\pi R_{mn'} \left(\frac{f}{c} + \frac{1}{\lambda} \right) \right) \quad (10)$$

其中 $R(f)$ 是 $\gamma(t)$ 的频域表示。将式(8)代入式(10)，得到

$$S_{cn'}(f, m) = \sigma R(f) \exp \left(-j2\pi (2R_i + \Delta R) \left(\frac{f}{c} + \frac{1}{\lambda} \right) \right) \quad (11)$$

因此，将式(11)乘以 $\exp(j2\pi\Delta R(f/c + 1/\lambda))$ 进行距离差的补偿，补偿之后 $S_{cn'}(f, m)$ 经过逆傅里叶变换 (IFT) 可转换为收发同置阵列接收到的信号，即

$$S_c(t, \tilde{x}_i) = \sigma \gamma \left(t - \frac{2R_i}{c} \right) \exp \left(-j4\pi \frac{R_i}{\lambda} \right) \quad (12)$$

为简单起见，本文暂不考虑距离单元徙动的影响，那么距离向中的 $R_i \approx y_0$ ，式(12)可写为

$$S_c(t, \tilde{x}_i) = \sigma \gamma \left(t - \frac{2y_0}{c} \right) \exp \left(-j4\pi \frac{R_i}{\lambda} \right) \quad (13)$$

对于 $S_c(t, \tilde{x}_i)$ 相位中的 R_i 可进一步的近似， $R_i \approx y_0 + (-2x_0\tilde{x}_i + \tilde{x}_i^2)/2y_0$ 。因此，可对 $S_c(t, \tilde{x}_i)$ 乘以相位因子 $\exp(j2\pi\tilde{x}_i^2/\lambda y_0)$ 进行方位向压缩，那么得到

$$\tilde{S}_c(t, \tilde{x}_i) = \sigma \gamma \left(t - \frac{2y_0}{c} \right) \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} y_0 \right) \exp \left(j \frac{4\pi x_0}{\lambda y_0} \tilde{x}_i \right) \quad (14)$$

若等效的收发同置阵列是均匀排布的，对式(14)做关于 \tilde{x}_i 的离散傅里叶变换(DFT)，即可得到运动目标的 2 维像。但收发同置阵列是稀疏分布的，直接运用 DFT 就会导致旁瓣很高。由于对空运动目标成像时，强散射点只占据成像区域的一小部分，满足 CS 理论中稀疏性的要求，同时稀疏阵列可看着原始均匀阵列的低维观测。因此本文引入 CS 理论进行后续成像处理。

事实上，在数字信号处理中所有接收通道得到的回波数据集 $\mathbf{X} = \{\tilde{S}_c(t, \tilde{x}_1)^H, \dots, \tilde{S}_c(t, \tilde{x}_{MN'})^H\}$ 可看作一个大小为 $L \times MN'$ 的矩阵，其中 L 为距离单元数， MN' 为稀疏收发同置阵列的阵元个数。假设原始均匀阵列得到的回波数据矩阵记为 \mathbf{Y} ，那么 \mathbf{X} 的每一行均可看作 \mathbf{Y} 每一行的低维观测，其中观测矩阵 $\Phi = \{\phi_{u,v}\}$ 为广义单位阵，且

$$\phi_{u,v} = \begin{cases} 1, & v = \delta_u, u = 1, \dots, MN', \delta_u \in 1, \dots, MN \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

从式(15)可以看出 Φ 中的任意行向量，除了第 δ_u 个元素为 1 外，其余均为零， δ_u 由稀疏收发同置阵元的位置决定。稀疏变换矩阵 Ψ 为 IDFT 变换矩阵，具体表达式为^[10]

$$\Psi = \frac{1}{MN} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W_{MN}^{-1} & W_{MN}^{-2} & \dots & W_{MN}^{-(MN-1)} \\ 1 & W_{MN}^{-2} & W_{MN}^{-4} & \dots & W_{MN}^{-2(MN-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W_{MN}^{-(MN-1)} & W_{MN}^{-2(MN-1)} & \dots & W_{MN}^{-(MN-1)^2} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$W_{MN} = \exp \left(-j \frac{2\pi}{MN} \right)$$

由于本文在构造稀疏接收阵列时，接收阵元是随机放置的，那么其等效的收发同置阵列相对于均匀阵列缺失阵元的位置也是随机的，满足广义单位阵 Φ 与 Ψ 不相干的要求，因此 $\Phi \cdot \Psi$ 满足 RIP 条件^[18]。假设目标在第 l ($l = 1, \dots, L$) 个距离单元内散射点分布为 Θ_l ，矩阵 \mathbf{X} 的第 l 行记为 \mathbf{X}_l ，那么根据 CS 理论，就可以通过求解下述表达式得到 Θ_l

$$\min \|\Theta_l\|_1 \text{ 满足 } \mathbf{X}_l^H = \Phi \Psi \Theta_l \quad (17)$$

对 $l = 1, \dots, L$ 均进行上述公式求解，可得到目标在所有距离单元的散射点分布，即为运动目标的 2 维像。

4 仿真实验

为了验证本文方法的有效性，下面通过飞机模型如图 4 进行成像仿真实验。假设原始 MIMO 雷达的天线布阵是 6 发 50 收。接收阵元的间隔为 2 m，发射阵元的间隔为 100 m。这里按照第 2 节稀疏布阵方式布置 6 发 25 收的天线阵列，阵列的稀疏度 η 为 50%。雷达系统发射混沌相位编码信号，子码元宽度 $\tau = 5$ ns，子码元数为 $\tilde{M} = 2000$ ，发射信号的时宽 $T_p = \tilde{M} \cdot \tau = 10$ μ s。对应的距离分辨率 $\Delta r = c\tau/2 = 0.75$ m。目标中心点的坐标 (0,10) km，那么获得的横向分辨率为 $\Delta c = 0.5$ m。仿真结果如图 5 所示：图 5(a)是等效均匀阵列成像结果；图 5(b)是稀疏阵列回波数据完成距离压缩和距离误差补偿得到的结果；图 5(c)是补零 FFT 成像结果；图 5(d)是利用本文方法成像结果。可以看出由于阵元缺失一半，直接对其进行补零 FFT 成像导致目标旁瓣较高，成像质量较差不便于目标识别。而利用本文方法目标所有的散射点均被准确重构，得到了较为理想的成像结果。

下面分析天线阵列在不同稀疏度情况下利用本文方法的成像结果。按照第 2 节的稀疏布阵方式分

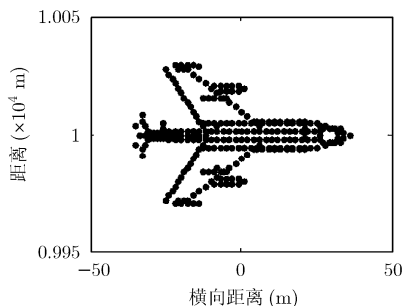
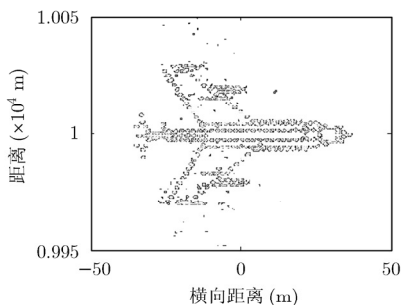
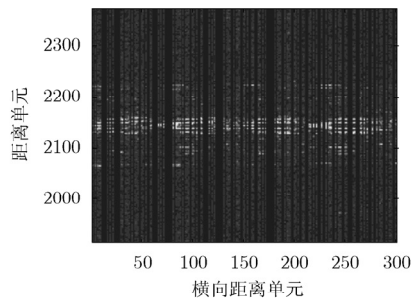


图 4 目标散射点模型

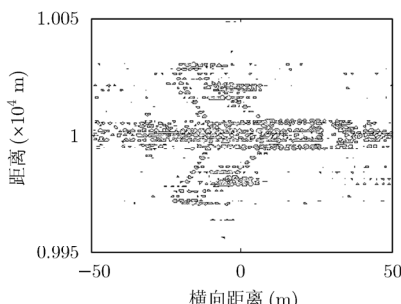
别布置 25, 20, 15 和 10 个接收阵元, 那么阵列的稀疏程度 η 为 50%, 40%, 30% 和 20%, 得到的成像结果如图 6(a)至 6(d)所示。从图 6 的 4 幅图可以看出, 随着阵列稀疏度的下降重构效果逐渐变差。这是由 CS 重构理论决定的, 即观测值越少重构效果越不理想。不过总的来看, 当阵列稀疏度 $\eta \geq 30\%$ 时, 目标的散射点基本能够被准确重构, 得到的成像结果完全能够满足后续目标识别的要求, 从而有效验证了本文方法在大幅减少 MIMO 雷达天线阵元的条件下可以得到较为理想的成像结果。



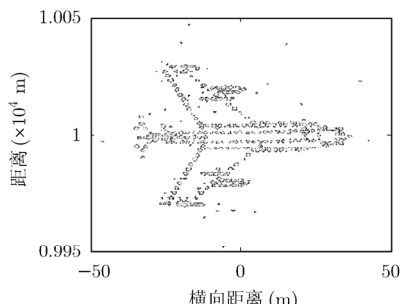
(a) 等效均匀阵列的成像结果



(b) 稀疏回波数据完成距离向处理结果

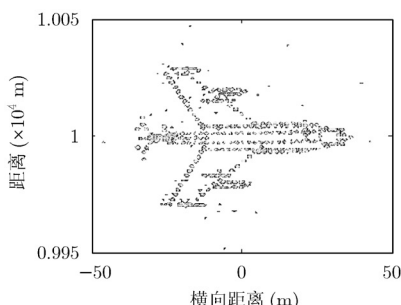


(c) 补零 FFT 成像结果

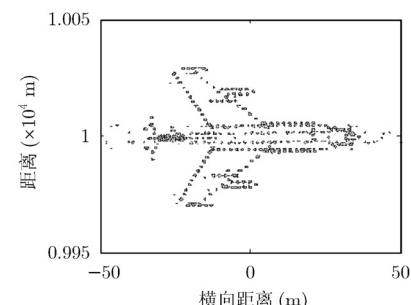


(d) 本文方法成像结果

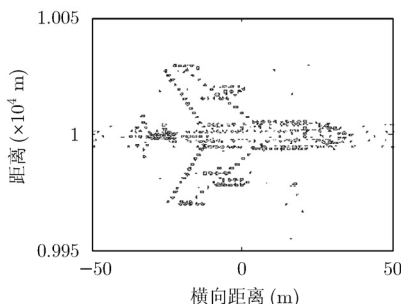
图 5 稀疏阵列成像结果



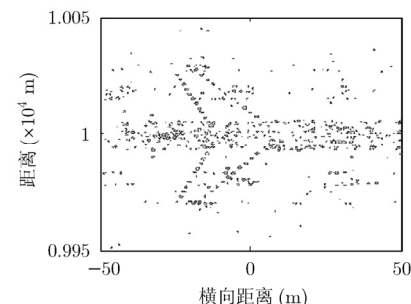
(a) $\eta=50\%$



(b) $\eta=40\%$



(c) $\eta=30\%$



(d) $\eta=20\%$

图 6 不同阵列稀疏度的成像结果图

5 结束语

利用 MIMO 雷达阵列对空中目标进行空间并行采样获取目标的 2 维信息, 可有效避免由于非合作目标的机动而引起的补偿难题, 但所需的天线阵元较多不便于工程实现, 因此本文构造稀疏的天线阵列用于大幅减少 MIMO 雷达的天线阵元。首先详细分析了稀疏阵列 MIMO 雷达的天线布阵方式, 其次结合 CS 理论具体阐述了稀疏阵列 MIMO 雷达的成像方法。最后的仿真实验表明, 只要 MIMO 雷达的阵列稀疏度控制在一定的范围内, 利用本文成像方法可以得到较为理想的单次快拍成像结果。总体看来, 本文将 CS 理论的降维思想引入到 MIMO 雷达的天线布阵中, 在大幅降低天线规模的基础上保证了对空目标成像的实时性和有效性, 具有一定的实际应用价值。

参考文献

- [1] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001: 1-4.
- [2] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 6-9.
- [3] Fishler E, Haimovich A, Blum R, *et al.* MIMO radar: an idea whose time has come [C]. Proceedings of the IEEE Radar Conference, Philadelphia, PA, April 2004: 71-78.
- [4] Bekkerman I and Tabrikian J. Target detection and localization using MIMO radars and sonars[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(10): 3873-3883.
- [5] 王怀军, 粟毅, 黄春琳. 基于天线布阵的 MIMO 雷达成像研究[J]. 信号处理, 2009, 25(8): 1203-1208.
Wang Huai-jun, Su Yi, and Huang Chun-lin. Study on MIMO radar imaging based on antenna array [J]. *Signal Processing*, 2009, 25(8): 1203-1208.
- [6] 朱宇涛, 郁文贤, 粟毅. 一种基于 MIMO 技术的 ISAR 成像方法[J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1885-1894.
Zhu Yu-tao, Yu Wen-xian, and Su Yi. An ISAR imaging method based on MIMO technique [J]. *Acta Electronics Sinica*, 2009, 37(9): 1885-1894.
- [7] Donoho D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [8] Baraniuk R and Steeghs P. Compressive radar imaging [C]. IEEE Radar Conference, Boston, MA, 2007: 128-133.
- [9] 石光明, 刘丹华, 高大化, 等. 压缩感知理论及其研究进展[J]. 电子学报, 2009, 37(5): 1070-1081.
Shi Guang-ming, Liu Dan-hua, Gao Da-hua, *et al.* Advances in theory and application of compressed sensing [J]. *Acta Electronics Sinica*, 2009, 37(5): 1070-1081.
- [10] Li Jun, Xing Meng-dao, and Wu Shun-jun. Application of compressed sensing in sparse aperture imaging of radar [C]. APSAR, Xi'an, China, Oct. 2009: 651-655.
- [11] Chen C Y and Vaidyanathan P P. Compressed Sensing in MIMO radar [C]. IEEE 42nd Asilomar Conference on Signals, System and Computers, Pacific Grove, CA, 2008: 41-44.
- [12] Yu Y, Petropulu A P, and Poor H V. MIMO radar using compressive sampling [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(1): 146-163.
- [13] 郑远, 胡英辉, 邓云凯. 混沌相位编码信号成像与反欺骗干扰仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(15): 3962-3965.
Zheng Yuan, Hu Ying-hui, and Deng Yun-kai. Point target imaging and anti-deceptive jamming simulation using chaotic phase code signal [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(15): 3962-3965.
- [14] Bellettini A and Pinto M A. Theoretical accuracy of synthetic sperture sonar micronavigation using a displaced phase-center antenna [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(4): 780-789.
- [15] Candés E. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing [J]. *Comptes Rendus Mathematic*, 2008, 346(9/10): 589-592.
- [16] Tropp J and Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via Orthogonal Matching Pursuit [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [17] Chen S, Basis pursuit[D]. [Ph.D. dissertation], Department of Staistics, Stanford University, 1995.
- [18] 金坚, 谷源涛, 梅顺良. 压缩采样技术及其应用[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(2): 470-475.
Jin Jian, Gu Yuan-tao, and Mei Shun-liang. An introduction to compressive sampling and its application [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(2): 470-475.

顾福飞: 男, 1987 年生, 硕士生, 研究方向为压缩感知理论与雷达成像。
池 龙: 男, 1958 年生, 硕士生导师, 研究方向为雷达信号处理与电子对抗。
张 群: 男, 1964 年生, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理与电子对抗。